

ИМПУЛЬСНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ЗАВАДОВСКАЯ Е. К.

Доцент, кандидат физико-математических наук

Введение

В условиях эксплуатации изоляция находится под воздействием рабочего напряжения при довольно высоких градиентах потенциала и одновременно может подвергаться воздействию блуждающих волн перенапряжения.

В литературе имеются указания на то, что одновременное воздействие на диэлектрик статического и импульсного напряжений может облегчить пробой [1].

Практически, до последнего времени, в электромашиностроении не приходилось считаться с возможностью понижения электрической прочности изоляции за счет совместного воздействия рабочего напряжения и блуждающих волн перенапряжения, так как уровень изоляции в машинах определялся напряжением коронирования, поэтому она работала при небольших градиентах потенциала. В настоящее время, когда разрабатываются машины на 20—60 кв рабочего напряжения, изоляция в таких машинах будет достаточно сильно нагружена электрически, и с указанным выше комбинированным воздействием напряжений при ее расчете нужно будет считаться.

В данной работе разбирается вопрос об импульсной прочности некоторых диэлектриков при одновременном воздействии на них статического напряжения. В таких условиях одновременного воздействия двух видов напряжений может оказаться линейная, машинная и аппаратная изоляция.

В наших опытах исследовались следующие диэлектрики: воздух, слюда, текстолит, прессшпан, каменная соль и трансформаторное масло. Воздух в качестве исследуемого диэлектрика был выбран, во-первых, потому, что он используется в качестве изоляции в электрических машинах, аппаратах и линиях электропередачи; во-вторых, в наших условиях испытания диэлектриков, в сравнительно сложных условиях, воздух служил своего рода индикатором.

Методика эксперимента

Исследование поведения изоляции при одновременном воздействии на нее двух видов напряжений проводилось в условиях однородного и неоднородного поля.

Были собраны пять различных экспериментальных установок, представляющих различные комбинации установок постоянного, переменного и импульсного напряжений.

Практически интересно одновременное воздействие на изоляцию переменного и импульсного напряжения. Ввиду короткой длительности употреблявшихся нами импульсных напряжений (длительность импульса— 10^{-5} — 10^{-4} ск) переменное напряжение по отношению импульсного, быстроменяющегося напряжения, можно рассматривать как статическое. Имея в виду, что результаты испытаний изоляции на постоянном и переменном напряжении одинаковы, для того чтобы не иметь дело с неопределенностью при одновременном воздействии на образец переменного и импульсного напряжений, связанной с фазовым углом, мы производили испытания при одновременном воздействии постоянного и импульсного напряжений.

Для получения одновременного воздействия на диэлектрик постоянного и импульсного напряжения была собрана установка по схеме I, представленная на рис. 1. Эта установка состоит из генератора импульсов,

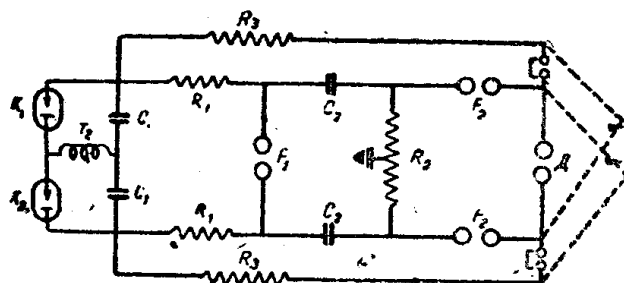


Рис. 1. Схема комбинированной электрической установки для получения постоянного и импульсного напряжений.

одновременно на образец возможно подавать постоянное напряжение от источника питания генератора. Источником питания генератора служила выпрямительная установка, собранная по схеме удвоения. На рис. 1 обозначено: T_2 — трансформатор, K — кенотроны, $C_1 = 0,02 \mu F$ — бумажно-масляные конденсаторы. К емкостям C_1 приключены, кроме зарядных сопротивлений R_1 ($R_1 = 10000 \Omega$), два сопротивления, обозначенные на рисунке R_2 ($R_2 = 1000 \Omega$), через которые осуществляется подача постоянного напряжения к исследуемому объекту. Место включения пробиваемого образца обозначено на рисунке буквой D . Цепь генератора импульсов отделена от цепи постоянного напряжения отсекающими шарами F_2 , которые пробивались при импульсах. В этот момент импульсное напряжение подавалось на исследуемый образец. Такая схема позволяла произвести исследование изоляции при одновременном воздействии на нее постоянного и импульсного напряжения как совпадающей, так и различной полярностей.

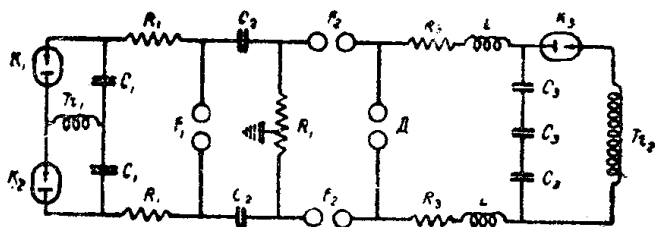


Рис. 2. Схема комбинированной электрической установки для получения постоянного и импульсного напряжений с посторонним источником постоянного напряжения.

Для проведения некоторых исследований, поставленных с целью определения импульсной прочности изоляции при воздействии на нее различного по величине постоянного напряжения, была собрана установка по схеме III, изображенная на рис. 2.

Комбинированная установка, собранная по схеме III, состоит из двух основных частей: генератора импульсов и установки постоянного напряжения, которые разделены между собой отсекающими шарами F_2 . С помощью установки, собранной по схеме III, можно моделировать работу изоляции в условиях эксплуатации, когда изоляция (разрядник D на рис. 2), с одной стороны, подвергается длительному воздействию статического напряжения (даваемого правой частью схемы), а с другой,—действию кратковременных импульсов (генерируемых левой частью схемы).

Кроме того, были поставлены некоторые опыты по пробое воздушных промежутков в однородном и неоднородном поле при одновременном воздействии постоянного и переменного напряжения. Для этих опытов была собрана комбинированная электрическая установка по схеме V, представленная на рис. 3, которая позволяла одновременно подать на разрядник постоянное и переменное напряжения. На рис. 3 даны два случая работы такой установки. Верхняя схема 1 представляет собой случай, когда острие является положительным, при включении по схеме В острие будет отрицательным.

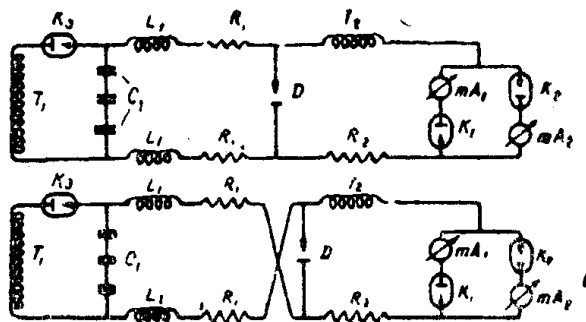


Рис. 3. Схема комбинированной электрической установки для получения постоянного и переменного напряжений.

Для замера тока, текущего в данном направлении, в установку переменного напряжения были включены два миллиамперметра — mA_1 и mA_2 с последовательно включенными с ними кенотронами K_1 и K_2 , последние были включены навстречу.

Пробой воздуха на импульсах при одновременном наложении постоянного напряжения

В наших опытах изучались: во-первых, импульсная прочность различных воздушных промежутков при одновременном воздействии постоянного напряжения, по своей величине близкого к величине импульсного

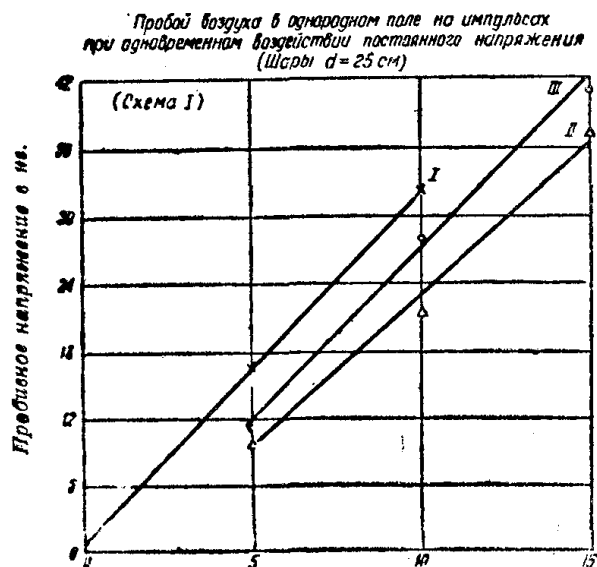


Рис. 4. Зависимость импульсного пробивного напряжения воздуха от величины одновременно действующего постоянного напряжения. Однородное поле.

напряжения, а, во-вторых, исследовалась импульсная прочность заданного постоянного воздушного промежутка при одновременном приложении постоянного напряжения различной величины. Результаты пробоя различных искровых промежутков в воздухе на импульсном напряжении при одновременном воздействии постоянного напряжения, близкого по величине к импульсному, даны на рисунке 4, где по оси ординат отложено импульсное пробивное напряжение в киловольтах, а по оси абсцисс—длина воздушного промежутка в мм. График I представляет собой зависимость величины импульсного пробивного напряжения от расстояния между измерительными шарами. Из этого графика видно, что при данных условиях опыта электрическая проч-

ность воздуха на импульсах составляла $E_{пр} = 32$ кв/см.

График II представляет собой зависимость импульсного пробивного напряжения от расстояния между шарами в случае наложения постоянного напряжения полярности, обратной полярности импульсного напряжения, и график III показывает зависимость импульсного пробивного на-

пряжения от расстояния между измерительными шарами при совпадающих полярностях постоянного и импульсного напряжений. Из рис. 4 следует, что импульсное пробивное напряжение, при одновременном наложении постоянного напряжения, понижается, причем большее понижение наблюдается в том случае, когда напряжение различных полярностей приходится на измерительный воздушный промежуток. В частности, из рис. 4 следует, что на импульсах воздушный промежуток в 10 мм пробивается при 32 кв, а при одновременном приложении постоянного напряжения обратной полярности импульсное пробивное напряжение понижается на 11 кв. Наложение постоянного напряжения совпадающей полярности вызывает понижение пробивного напряжения на 4 кв. Таким образом, в результате проведенных опытов можно сделать заключение о наличии влияния постоянного напряжения на импульсную прочность воздуха. По нашим данным, при этом играет роль полярность постоянного напряжения, одновременно прикладываемого к воздушному промежутку.

Полученная зависимость импульсного разрядного напряжения от полярности прикладываемого постоянного напряжения представлена на рис. 5, где дана зависимость импульсного пробивного напряжения от величины одновременно приложенного постоянного напряжения для воздушного промежутка длиной 15 мм в случае однородного поля. По оси ординат

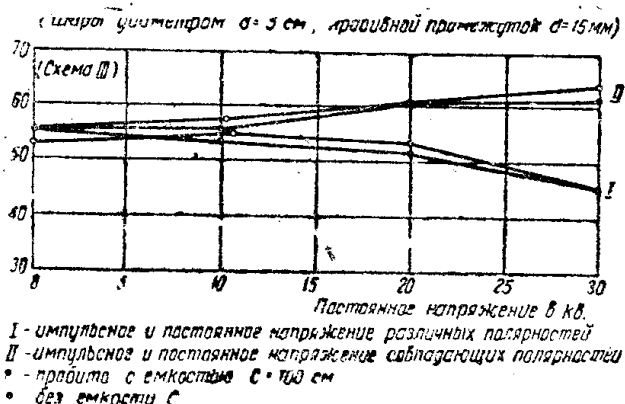


Рис. 5. Зависимость импульсного пробивного напряжения воздуха от величины одновременно действующего постоянного напряжения. Однородное поле. Испытание по схеме III.

дается повышение импульсного пробивного напряжения.

Результаты опытов по исследованию влияния величины и полярности постоянного напряжения на величину импульсного пробивного напряжения в случае неоднородного поля имеют тот же вид, что и в случае однородного поля. В неоднородном поле это влияние выражено более сильно.

Таким образом, в разных условиях опытов всегда наблюдается понижение импульсного пробивного напряжения воздуха при различных полярностях постоянного и импульсного напряжений и повышение — в случае совпадающих полярностей обоих напряжений. При этом с ростом постоянного напряжения увеличивается как повышение, так и понижение импульсного пробивного напряжения, и при величине постоянного напряжения в 35 кв максимальная разница между импульсным пробивным напряжением при наложении постоянного напряжения в неоднородном поле, в случае совпадающих и различных полярностей, достигает 45 кв.

Результаты наших опытов показывают, что при одновременном действии на искровой промежуток статического и импульсного напряжений, им-

отложены значения импульсного пробивного напряжения в киловольтах, а по оси абсцисс — величина постоянного напряжения в киловольтах. Кривые, обозначенные цифрой I, показывают изменение импульсного пробивного напряжения для данного промежутка, в зависимости от величины постоянного напряжения при совпадающих полярностях. Из рис. 5 следует, что в случае различных полярностей с увеличением постоянного напряжения наблюдается понижение импульсного пробивного напряжения. При совпадающих полярностях постоянного и импульсного напряжений наблю-

пульсная прочность сильнее изменяется в случае неоднородного поля. Это обстоятельство является весьма существенным, так как практически изоляция работает в условиях неоднородного поля. Нам не удалось установить количественной закономерности, да и вряд ли это возможно, так как наблюдаемый эффект должен сильно зависеть от параметров схемы, на которую падает импульс, что мы и наблюдали в наших опытах. Общая закономерность явления нами установлена. Она заключается в том, что с увеличением дополнительно действующего постоянного напряжения увеличивается скорость изменений импульсного напряжения. Таким образом, при переходе к установкам более высокого напряжения опасность для воздушной изоляции от действия комбинированного статического и импульсного напряжений увеличивается.

Наблюдаемое явление — изменение импульсной прочности изоляции при комбинированном воздействии постоянного и импульсного напряжений — объясняется сложением и вычитанием напряжений, даваемых двумя источниками.

При воздействии на искровой промежуток импульсным и постоянным напряжениями различных полярностей статическое напряжение и импульсное складывались, что можно изобразить схемой, представленной на рис. 6, где по оси ординат отложено напряжение, а по оси абсцисс — время. Как видно, в этом случае, без учета потерь, испытываемая изоляция оказывается под напряжением, равным сумме напряжений импульсного и статического. В результате такого наложения импульсное пробивное напряжение промежутка окажется пониженным; степень понижения будет зависеть от величины действующего статического напряжения.

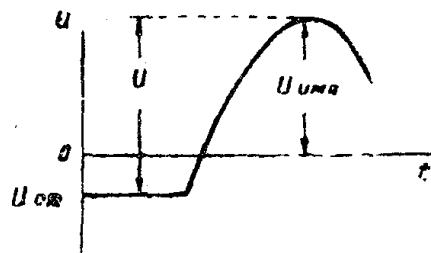


Рис. 6. Схема сложения напряжений различных полярностей.

Такой случай мы можем иметь при падении на возбужденный трансформатор волны перенапряжения. Вероятность совпадения воздействия волны перенапряжения с соответствующим максимумом рабочего напряжения является значительной, и в этих условиях воздушная изоляция подвергается серьезному испытанию. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе уровня изоляций трансформатора. Пример такого нарушения воздушной изоляции при комбинированном воздействии рабочего напряжения и импульсной волны перенапряжения можно найти также и в практике эксплуатации линии электропередач. Например, В. Н. Залеский [1] в реферате доклада Спорна и Гросса Американскому институту инженеров-электриков приводит следующие материалы по грозопоражаемости линий электропередачи: „Осцилографические замеры на некоторых линиях в 1934—1937 гг. показали, что из 300 замеренных поражений в 178 случаях (59,3%) полярность пораженного провода была положительной, в 102 случаях (34%) — отрицательной, а в остальных 20 случаях (6,7%) напряжение было равно нулю“.

Исследованиями многих авторов [2] было установлено преобладание отрицательных разрядов молнии, составляющих 90% всех разрядов.

Приведенные выше данные, показывающие, что молнией поражается преимущественно положительный провод, находятся в хорошем согласии с нашими результатами, говорящими о том, что при комбинированном воздействии на искровой промежуток импульсного и статического напряжения он легче пробивается при разноименной полярности этих напряжений.

Наши результаты были получены для искровых промежутков небольшой величины (до 30 мм). Данные Спорна и Гросса, очевидно, говорят

за то, что эти результаты могут быть распространены и на искровые промежутки порядка нескольких метров.

Уменьшение импульсной прочности искрового промежутка при одновременном воздействии разноименного статического напряжения и увеличение прочности при воздействии одноименного напряжения навело на мысль использовать этот эффект для целей выпрямления переменного тока.

Следует ожидать, что при наложении на воздушный промежуток постоянного и переменного напряжений в один полупериод, когда полярности будут совпадающими, создадутся условия для упрочнения воздушного промежутка и пробой будет затруднен. В другой полупериод, когда полярности будут различными, создадутся условия для ослабления воздушного промежутка и пробой произойдет.

На основании этих предположений был произведен ряд опытов на специально собранной для этой цели установке, позволяющей подавать на исследуемый воздушный промежуток одновременно постоянное и переменное напряжения; схема этой установки представлена на рис. 3. Для гашения дуги, загорающейся при пробое между электродами, было применено искусственное обдувание промежутка струей воздуха под давлением.

Выпрямляющее свойство такой установки наблюдалось в условиях однородного и неоднородного поля.

При некоторых сочетаниях приложенного к электродам напряжения и силы обдувания удавалось получить полное выпрямление. В этих случаях в запальном направлении миллиамперметр показывал ток, равный нулю. Нам кажется, что кратко описанное выше свойство вентильности воздушных промежутков, обнаруживаемое при одновременном действии на них двух напряжений — постоянного и переменного, может найти свое практическое применение для целей выпрямления переменного тока, а также в цепях управления и сигнализации.

Пробой твердых и жидких диэлектриков импульсами при одновременном наложении постоянного напряжения

Исследование импульсного пробивного напряжения каменной соли при одновременном наложении постоянного напряжения производилось нами в условиях однородного поля на установках, представленных на рис. 1, 2.

Результаты определений импульсного пробивного напряжения каменной соли при одновременном наложении постоянного напряжения, произведенных на установке, собранной по схеме 1, представлены на рис. 7. На оси ординат нанесены значения импульсных пробивных напряжений каменной соли, на оси абсцисс — толщина пробиваемых образцов в мм. Кривая I представляет собой зависимость импульсного пробивного напряжения от толщины образцов, кривая II — зависимость импульсного пробивного напряжения от толщины образцов при наложении постоянного напряжения в случае различных полярностей постоянного и импульсного напряжений, кривая III — зависимость импульсного пробивного напряжения от толщины образцов в случае совпадающих полярностей и кривая IV — зависимость пробивного напряжения от толщины образцов на постоянном напряжении.

Полученные результаты — в основном такие же, как при пробое воздуха. Импульсное пробивное напряжение каменной соли, при одновременном воздействии постоянного напряжения обратной полярности, понижается. Этот результат совпадает с тем, что наблюдал Грюнвальд [3] для мадрасской слюды.

При наложении постоянного напряжения совпадающей полярности импульсное пробивное напряжение диэлектрика повышается. Такой же результат наблюдается, например, при испытании каменной соли на установке, собранной по схеме III. Результат этих испытаний представлен на рис. 8.

Пробой каменной соли при одновременном наложении постоянного напряжения, по величине близкого к импульсному, показал, что наложение постоянного напряжения полярности, обратной импульсному, приводит к понижению пробивного напряжения каменной соли.

Пробой слюды в неоднородном поле на импульсах при одновременном воздействии постоянного напряжения показал, что пробивное напряжение слюды, на импульсах при одновременном воздействии постоянного напряжения противоположной полярности, заметно понижается.

Рассмотренные выше диэлектрики — воздух, каменная соль и слюда — обладают элект-

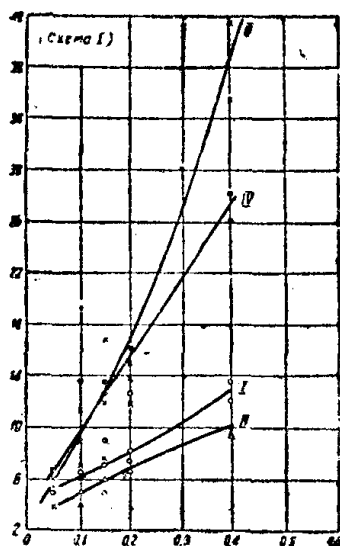


Рис. 7. Зависимость импульсного пробивного напряжения каменной соли от величины одновременно действующего постоянного напряжения. Однородное поле. Испытание по схеме I.

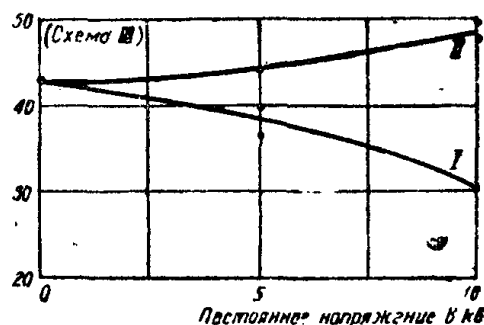


Рис. 8. Зависимость импульсного пробивного напряжения каменной соли от величины одновременно действующего постоянного напряжения. Однородное поле. Испытание по схеме III.

трической формой пробоя. Испытанные нами фарфор, эбонит и стекло, по причине плохого качества имевшихся у нас материалов, в тонких слоях не дали столь ясных результатов, как слюда и другие диэлектрики; несмотря на большой разброс точек, общий характер получившейся зависимости для фарфора, эбонита и стекла был такой же, как и для воздуха, слюды и каменной соли.

Затем были исследованы диэлектрики, имеющие при комнатной температуре тепловую форму пробоя. К этому классу диэлектриков относятся прессшпан, гетинакс, текстолит и трансформаторное масло. Измерениями В. А. Воробьева [4] было показано, что для них наблюдается характерная для тепловой формы пробоя линейная зависимость логарифма пробивного напряжения от температуры.

В наших опытах пробой прессшпана производился между электродами острие против плоскости при погружении их в масло. Образцы прессшпана, представлявшие собою пластины размером $30 \times 30 \times 0,5$ мм, предварительно длительно (6—8 часов) проваривались в трансформаторном масле при температуре 90°C . В результате проварки в масле образцы получали равномерную пропитку и становились довольно однородными. Пробой таких образцов давал малый разброс точек. Образцы до пробоя хранились в сосуде с маслом. В наших опытах употреблялись два сорта прессшпана, различавшиеся толщиной (0,5 и 0,8 мм). Для обоих сортов пресс-

шпана результаты испытания оказались одинаковыми. Практически можно считать, что величина пробивного напряжения прессшпана на импульсах при одновременном воздействии статического напряжения полярности, совпадающей и противоположной полярности импульсов, почти не меняется. Можно заметить лишь некоторую тенденцию к образованию вилки

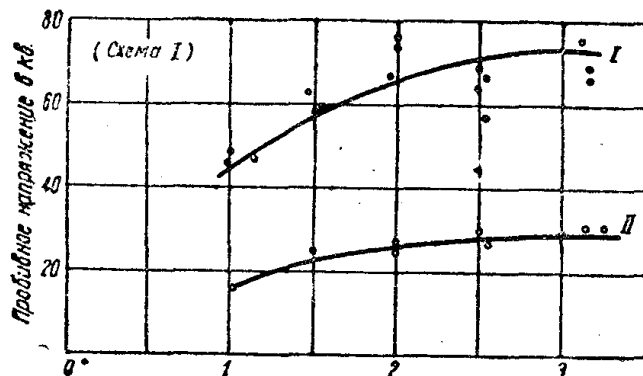


Рис. 9. Зависимость пробивного напряжения текстолита от толщины образцов на импульсах и постоянном напряжении. Однородное поле.

лежит значительно ниже пробивного напряжения на импульсах (рис. 9). Отсюда следует, что во всем диапазоне исследованных толщин импульсная прочность текстолита приблизительно в три раза больше прочности на постоянном напряжении.

При испытании по схеме I, когда постоянное напряжение растет вместе с увеличением импульсного напряжения, естественно, пробой происходит на постоянном напряжении прежде, чем импульсное напряжение нарастает до разрушающего. Такие же результаты были получены при испытании трансформаторного масла с помощью установки, собранной по схеме I. Пробой трансформаторного масла производился между стандартными электродами при расстоянии между ними, равном 1 и 2 мм. Исследование импульсной прочности трансформаторного масла при одновременном наложении постоянного напряжения, по величине близкого к импульсному, показало отсутствие влияния постоянного напряжения. Исследование пробоя в этих условиях привело к заключению, что пробой, так же как и для текстолита, происходил за счет действующего постоянного напряжения.

Заключение

Экспериментальное исследование импульсной прочности ряда изоляционных материалов показывает, что при одновременном воздействии импульсного и статического напряжений различных полярностей наблюдается понижение их импульсной прочности и повышение в случае совпадающих полярностей. Наблюдаемое явление — изменение импульсной прочности изоляции при комбинированном воздействии статического и импульсного напряжений является результатом сложения или вычитания этих напряжений.

В случае, когда импульсное пробивное напряжение диэлектрика значительно превышает статическое, что имеет место при тепловой форме пробоя, эффект комбинированного действия напряжений отсутствует. Импульсная прочность диэлектриков, обладающих электрической формой пробоя, например, воздуха, слюды и других, при одновременной подаче статического напряжения обратной полярности понижается в наихудшем случае на величину приложенного постоянного напряжения.

Наблюдаемое изменение пробивного напряжения воздушного искрового промежутка при одновременном воздействии на него двух напряжений нами было использовано для целей выпрямления переменного тока.

С эффектом понижения пробивного напряжения изоляции при одновременном воздействии на нее двух напряжений необходимо считаться при выборе уровня изоляции для аппаратов и машин, а также при ее испытании.

Наблюдаемое явление находит себе применение для объяснения нарушения электрической прочности изоляции при падении волн перенапряжений на установки электрического тока, находящиеся под напряжением, и может быть использовано для целей сигнализации управления и защиты и выпрямления переменного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Залесский. Электрические станции, 4—5, 93, 1939.
2. И. С. Стекольников. Молния. Изд. АН СССР, 1940.
3. F. Grünwald. Arch. f. El. 12, 1, 1923.
4. В. А. Воробьев. Электричество, 53—1940.